文章编号：1000-5773(2012)04-0415-06

强冲击载荷下氧化铝陶瓷靶破坏过程的SPH数值模拟*

王凤英[1]，刘迎彬[1,2]，刘天生[1]，胡晓艳[2]

(1.中北大学化工与环境学院，山西太原 030051；
2.中国科学技术大学近代力学系，安徽合肥 230027)

摘要：陶瓷材料因具有低密度、高强度和高声速等良好的力学特性，被广泛应用到军事、航空航天和舰船防护等领域。为了研究氧化铝陶瓷靶板在强冲击载荷下的破坏性能，利用AUTODYN软件，采用光滑粒子流体动力学求解器对钨合金弹丸撞击氧化铝陶瓷靶过程进行模拟计算。将模拟结果与实验结果进行对比可知，模拟结果与实验结果非常吻合，说明所采用的计算方法正确。该研究方法为分析氧化铝陶瓷在强冲击载荷下的破坏特性提供了一种方便的途径，节省了研究时间和研究成本，提高了研究效率。

关键词：冲击；氧化铝陶瓷；侵彻；光滑粒子流体动力学
中图分类号：O385 **文献标识码**：A

1 引 言

陶瓷材料以其低密度和高固有强度被广泛应用于装甲防护，使设计具有高防护性能的轻量化装甲系统成为可能。作为重要的装甲防护材料，陶瓷材料已在军事工程、航空航天、舰船结构等防护领域得到了广泛应用。其动态力学响应、动态破坏和破坏特性是分析复合装甲防护性能的关键因素。

到目前为止，长杆侵彻体对厚陶瓷片的侵彻过程一直是人们研究的焦点。通过2-D程序模拟，Mescall等人[1]开创性地研究了侵彻体对陶瓷片的侵彻过程，结果表明，侵彻前由撞击产生的高压缩应力波和高拉伸应力波能够在陶瓷内引起相当大的损伤；Sternberg[2]采用分析侵彻模型(如Tate[3]的1-D模型)描述了长杆侵彻体与陶瓷靶的相互作用；Rozenberg等人[4]首次通过测量残余侵彻深度的方法，确定了与陶瓷片压缩强度有关的一个强度参数对侵彻的阻力；Curran等人[5]建立了强冲击下陶瓷片粉碎颗粒流动的微观力学模型；Cortes等人[6]数值模拟了陶瓷复合装甲的撞击过程，给出了一个考虑内摩擦和体积膨胀的细粉碎陶瓷的本构模型；Grace等人[7]将Curran等人[5]和Cortes等人[6]的模型结合起来，分析高速弹丸侵彻陶瓷靶过程；Anderson等人[8]采用穿透深度实验方法研究了AD90陶瓷材料的抗长杆弹侵彻能力；李平等人[9]采用穿透深度实验方法研究了质量分数为90%的氧化铝陶瓷复合靶抗长杆弹丸的侵彻性能；任会兰等人[10]利用有限元方法和平板撞击实验，研究了氧化铝陶瓷在强冲击下的破坏特性。

强冲击载荷具有瞬时、高压力和高应变率的特点。采用实验手段研究材料在高速载荷下的动态破坏机理时，由于实验周期长、费用高，一些实验现象难以捕捉，因而受到很大的限制。运用数值模拟方法对此类复杂问题进行研究则可以大大缩短实验周期和研究经费，同时还能预测实验结果，拓宽实验范围，对实验起到一定的指导作用。因此，数值模拟分析与实验相结合的方法在动态冲击研究工作中得

* **收稿日期**：2010-12-11；**修回日期**：2011-01-05
作者简介：王凤英(1955－)，女，硕士，教授，主要从事弹药毁伤与防护研究. E-mail:liulang827@163.com

到了广泛应用。

目前,大多数模拟方法都采用有限元法。尽管欧拉方法已被广泛用于模拟材料对大变形的响应,但是在平流计算中欧拉法会引入误差。拉格朗日方法虽然在计算材料接触时有较好的精度,但是它需要人工技术来处理大变形问题。光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics,SPH)方法是一种无网格拉氏计算方法,计算空间导数时不需要使用网格,适于计算大变形问题。SPH 方法是由 Lucy[11] 于 1977 年提出的一种纯拉格朗日的粒子方法;1982 年 Monaghan 等人[12] 提出适用于 SPH 方法的插值核理论,并引入人工粘性项,模拟了流场中的激波强间断现象;1993 年,Libersky 等人[13] 将材料强度效应引入 SPH 方法,使 SPH 方法可以解决弹塑性流体力学问题;1995 年,Benz 等人[14] 首次使用 SPH 方法对脆性材料进行数值模拟,给出了一种处理脆性断裂的方法。与基于欧拉和拉格朗日的网格法相比,SPH 法具有更大的潜在优势,这是因为 SPH 法不需要计算网格,对于大变形问题,不存在网格扭曲问题。对于弹丸撞击陶瓷片过程中的不同阶段,SPH 法均能够有效模拟撞击过程中出现的如陶瓷断裂及粉碎、陶瓷锥形成等复杂问题。特别地,SPH 方法还成功地应用到断裂现象模拟中。

本研究利用 AUTODYN 软件建立计算模型,使用 SPH 求解器,对弹丸撞击陶瓷靶板的全过程进行数值模拟,分析陶瓷靶板在强冲击载荷下的破坏特性,为研究氧化铝陶瓷在强冲击载荷下的破坏特性提供一种便捷的方法,同时为氧化铝陶瓷装甲的设计提供一定的理论基础。

2 SPH 数值模拟方法

2.1 SPH 基本方程

考虑材料的弹塑性效应时,全应力张量空间中的 SPH 插值公式可表示为[15]

质量守恒
$$\frac{\mathrm{d}\rho_i}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{N}m_j v_{ij}^{\beta}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \tag{1}$$

动量守恒
$$\frac{\mathrm{d}v_i^{\alpha}}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{N}m_j\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}+\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_i\rho_j}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \tag{2}$$

能量守恒
$$\frac{\mathrm{d}e_i}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}m_j v_{ij}^{\beta}\frac{p_i+p_j}{\rho_i\rho_j}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}}+\frac{\mu_i}{2\rho_i}\varepsilon_i^{\alpha\beta}\varepsilon_j^{\alpha\beta} \tag{3}$$

式中:ρ 为密度,m 为质量,v 为速度,p 为压力,i、j 代表不同粒子,α、β 代表坐标方向,σ 为应力,ε 为应变,e 为单位质量物质内能,μ 为动态粘性,N 为粒子 i 的支持域中粒子的总数,W 为核函数。计算时,W 取为

$$W(z,h)=\begin{cases}1-3z^2/2+3z^3/4 & 0\leqslant|z|<1\\(2-z)^3/4 & 1\leqslant|z|<2\\0 & |z|\geqslant 2\end{cases} \tag{4}$$

式中:h 为光滑核长度,$z=(x_i-x_j)/h$。

2.2 计算模型

本研究对氧化铝陶瓷靶在强冲击载荷作用下的破坏特性进行模拟,采用 Sarva 等人[16] 的实验数据对模拟结果的有效性进行验证。实验中,钨合金圆柱平头弹丸的直径为 6 mm,长度为 19.8 mm;氧化铝陶瓷的尺寸为 100 mm×100 mm×12.7 mm,密度为 3.92 g/cm^3,氧化铝的纯度为 99.5%;弹丸初始速度为 900 m/s。实验时采用高速摄像记录撞击全过程,得到了撞击后靶板的破坏情况。以此实验条件为基准,采用 AUTODYN 软件中的 SPH 求解器,模拟弹丸撞击氧化铝陶瓷靶全过程,获得撞击后靶板的破坏情况。考虑到模型的对称性,建立 1/4 模型,图 1 为弹丸撞击氧化铝陶瓷靶的模型示意图。

2.3 材料参数与模型选择

MAT-JOHNSON-HOLMQUIST-CER-MICS 模型能够有效模拟陶瓷、玻璃和其它脆性材料的力学响应,因此本研究采用该模型进行数值模拟。该模型中等效应力 σ^* 为

$$\sigma^*=\sigma\sigma_{\mathrm{i}}^*-D_{\mathrm{t}}(\sigma_{\mathrm{i}}^*-\sigma_{\mathrm{f}}^*) \tag{5}$$

式中:σ_i^* 为未损伤陶瓷材料的无量纲有效应力,σ_f^* 为完全损伤材料的无量纲有效应力,D_t 为基于每个计算循环里的塑性应变增量的累积破坏断裂准则。未损伤材料的无量纲有效应力 σ_i^* 为

$$\sigma_i^* = a(p^* + T^*)^n(1 + c\ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{6}$$

式中:a、c、n 为材料常数;p^* 为无量纲压力,$p^* = p/p_{HEL}$,其中 p_{HEL} 为 Hugoniot 弹性极限下的压力;T^* 为无量纲静水拉伸应力,$T^* = T_{max}/p_{HEL}$,其中 T_{max} 为材料能承受的最大静水拉伸应力;无量纲应变率 $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$,参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0\ s^{-1}$。完全破坏材料的无量纲有效应力 σ_f^* 为

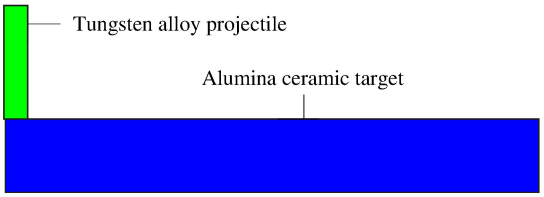


图 1 弹丸撞击氧化铝陶瓷靶计算模型图

Fig. 1 Model of alumina ceramic impacted by projectile

$$\sigma_f^* = b(1 + c\ln\dot{\varepsilon}^*)p^{*m} \leqslant \sigma_{f,max}^* \tag{7}$$

式中:b、m、$\sigma_{f,max}^*$ 为材料常数。陶瓷等脆性材料的损伤演化可定义为

$$D_t = \sum(\Delta\varepsilon^p/\varepsilon_f^p) \tag{8}$$

式中:$\Delta\varepsilon^p$ 为一个积分循环的有效塑性应变,ε_f^p 为一定压力下的断裂应变。ε_f^p 的表达式为

$$\varepsilon_f^p = d_1(p^* + T^*)^{d_2} \tag{9}$$

式中:d_1、d_2 为模型参数。

无损伤情况的静水压力-比容关系可表示为

$$p = \begin{cases} K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 & \mu \geqslant 0 \\ K_1\mu & \mu < 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中:K_1、K_2、K_3 为材料常数;$\mu = (\rho/\rho_0) - 1$,其中 ρ_0 为初始密度。

有损伤材料的静水压力-比容关系可表示为

$$p = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta p \tag{11}$$

式中:压力增量 Δp 从能量角度获得。

钨合金弹丸采用 Steinberg-Guinan 模型[17]描述。Steinberg-Guinan 模型是将剪切模量 G 和屈服强度 Y 作为压力 p 和温度 T 的函数,具体表达式为

$$G = G_0\left[1 + \left(\frac{G_p'}{G_0}\right)\frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G_T'}{G_0}\right)(T - 300)\right] \tag{12}$$

$$Y = Y_0[1 + \gamma(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n\left[1 + \frac{Y_p'}{Y_0}\frac{p}{\eta^{1/3}} + \frac{G_T'}{G_0}(T - 300)\right] \tag{13}$$

同时规定限定条件

$$Y_0[1 + \gamma(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \leqslant Y_{max} \tag{14}$$

$$\begin{cases} G = 0 \\ Y = 0 \end{cases} \quad T \geqslant T_m \tag{15}$$

式中:η 为压缩比,$\eta = V_0/V$;γ、n 为应变硬化参数;ε_i 为初始塑性应变;G_0 为常温常压下的剪切模量;Y_0 为最高应变率或最低温度实验的初始屈服强度;G_p'、G_T'、Y_p' 为 G 和 Y 对压力 p 或温度 T 的一阶偏导数;Y_{max} 为应变硬化允许的最大值;T_m 为与压力相关的熔化温度。

所有材料模型参数均选自 AUTODYN 数据库。

3 结果对比与分析

图 2 给出了钨合金弹丸撞击氧化铝陶瓷靶板过程的实验结果[16]及数值模拟结果,其中数值模拟结果采用损伤云图表示,红色表示完全损伤,即陶瓷被完全破坏,也可理解为 Sarva 等人[16]描述的陶瓷粉碎变成陶瓷粉末。从图 2 中的模拟结果可以看出:当弹丸刚撞击陶瓷靶板时,陶瓷靶因受到很强的冲击

压力，会在钨合金弹丸的前面形成一个粉碎区；10 μs 时，陶瓷靶背面已经出现了一个鼓包，这与实验结果一致；随着弹丸侵彻，被粉碎的陶瓷向外喷射，在喷射开始阶段陶瓷粉末从靶板前面向外喷射；随着弹丸进一步侵彻，陶瓷靶背面的部分区域也开始破碎，并向外喷射；最后，粉碎的陶瓷靶粉末形成圆锥状，包围在弹丸周围。

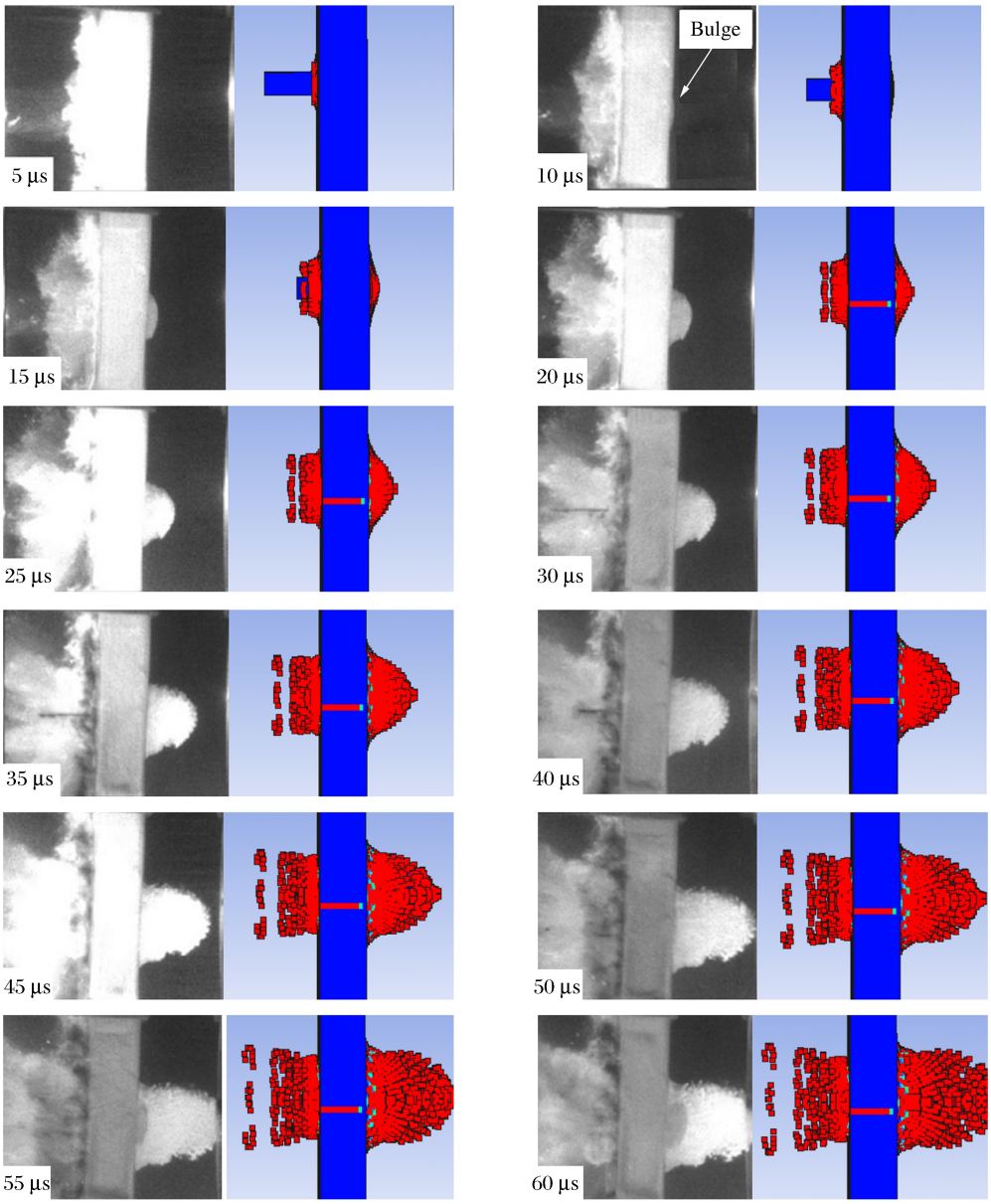


图 2 钨合金弹丸撞击氧化铝陶瓷靶板过程的实验结果与模拟结果

Fig. 2 Experimental and numerical results of impact interaction between an alumina ceramic target and a tungsten alloy projectile

弹丸与陶瓷靶的总能量($E_{\mathrm{tot,p}}$、$E_{\mathrm{tot,c}}$)及动能($E_{\mathrm{k,p}}$、$E_{\mathrm{k,c}}$)随时间的变化关系如图 3 所示。可见，随着陶瓷粉末向外喷射，相当多的弹丸动能转变成喷射陶瓷粉末的动能。

图 4 给出了侵彻陶瓷靶板后钨合金弹丸残留部分形貌。从图 4 可以看出，模拟结果与 Sarva 等人[16]的实验结果非常吻合。通过测试可知，残留弹丸长度为 14.8 mm，说明在侵彻陶瓷靶过程中，弹丸质量减少了 25%，此时弹丸仍具有较大的侵彻能力。

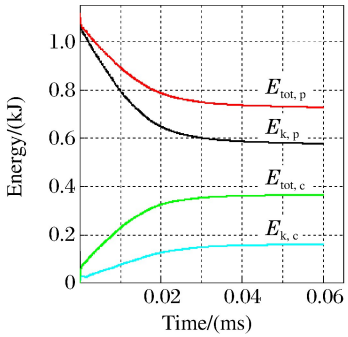
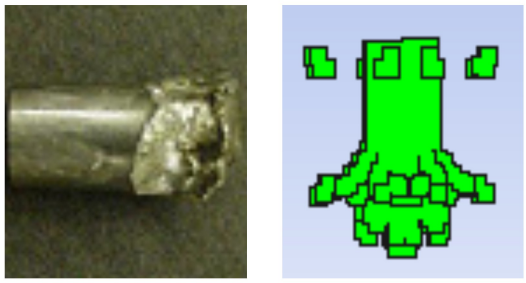


图 3　弹丸和氧化铝陶瓷的能量变化曲线

Fig. 3　Energy curves of the projectile and alumina ceramic

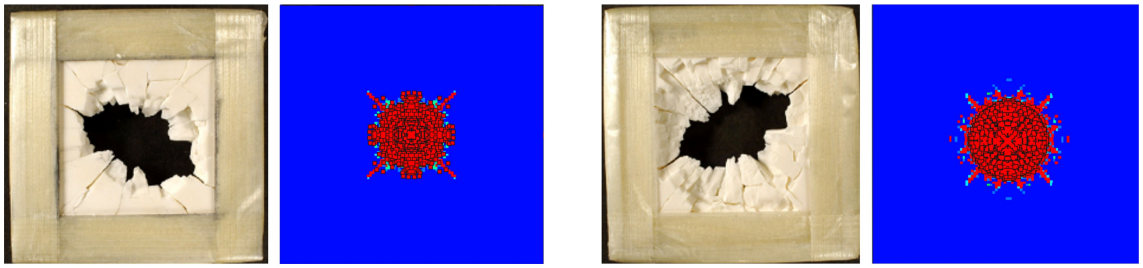


(a) Experimental result　　(b) Simulated result

图 4　残余弹丸

Fig. 4　Residual projectile

图 5 给出了实验后陶瓷靶板前、后面视图。可见,模拟结果与 Sarva 等人[16]的实验结果基本一致。从图 5 中的模拟结果可知:陶瓷这类脆性材料沿着与水平轴呈 45°夹角的方向发生断裂。



(a) Front view　　(b) Back view

图 5　陶瓷靶前后面视图

Fig. 5　Front and back views of the ceramic target

4　结　论

利用 SPH 方法,对钨合金弹丸撞击氧化铝陶瓷靶板过程进行了数值模拟,获得了撞击过程的破坏云图、残留弹丸形貌和撞击后陶瓷靶板前、后面形貌,并将模拟结果与实验结果进行对比。结果表明:模拟结果与实验结果非常吻合,说明模拟非常有效,可以用 SPH 模拟方法代替一些实验研究,进而减少研究时间和研究成本,提高研究效率。

References:

[1] Mescall J, Tracy C. Improved modeling of fracture in ceramic armor [A]//Proceedings of the 1986 Army Science Conference [C]. New York, 1986: 41.

[2] Sternberg J. Material properties determining the resistance of ceramics to high velocity penetration [J]. J Appl Phys, 1989, 65(9): 3417-3424.

[3] Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact [J]. J Mech Phys Solids, 1967, 15(6): 387-399.

[4] Rozenberg Z, Yeshurun Y. The relation between ballastic efficiency and compressive strength of ceramic tiles [J]. Int J Impact Eng, 1988, 7(3): 357-362.

[5] Curran D R, Seaman L, Cooper T, et al. Micromechanical model for comminution and granular flow of brittle material under high strain rate application to penetration of ceramic targets [J]. Int J Impact Eng, 1993, 13(1): 53-83.

[6] Cortes R, Navarro C, Martinez M A, et al. Numerical modelling of normal impact on ceramic composite armours [J]. Int J Impact Eng, 1992, 12(4): 639-650.

[7] Grace F I, Rupert N L. Analysis of long rods impacting ceramic targets at high velocity, ARL-TR-1493 [R]. USA: Army Research Laboratory, 1997.

[8] Anderson C E, Morris B L. The ballistic performance of confined Al_2O_3 ceramic tiles [J]. Int J Impact Eng, 1992, 12(2): 167-187.

[9] Li P, Li D H, Ning J G, et al. Experimental study on the ballistic performance and mechanism of confined ceramic targets against long rod penetrators [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 289-294. (in Chinese)
李 平, 李大红, 宁建国, 等. Al_2O_3 陶瓷复合靶抗长杆弹侵彻性能和机理实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4): 289-294.

[10] Ren H L, Shu X F, Li P. Numerical and experimental investigation on the fracture behaviors of shock loaded alumina [J]. Science in China Series G, 2009, 39(9): 1221-1230. (in Chinese)
任会兰, 树学锋, 李 平. 强冲击载荷下氧化铝陶瓷破坏特性的数值模拟及实验研究 [J]. 中国科学 G 辑, 2009, 39(9): 1221-1230.

[11] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. Astron J, 1977, 82: 1013-1024.

[12] Monaghan J J. On the problem of penetration in particle methods [J]. J Comput Phys, 1989, 82: 1-15.

[13] Libersky L D, Petschek A G, Carney T C, et al. High strain Lagrangian hydrodynamics: A three-dimensional SPH code for dynamic material response [J]. J Comput Phys, 1993, 109(1): 67-76.

[14] Benz W, Asphang E. Simulations of brittle solids using smooth particle hydrodynamics [J]. Comput Phys Commun, 1995, 87: 253-265.

[15] Liu G R, Liu M B. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method [M]. London: World Scientific, 2003.

[16] Sarva S, Nemat-Nasser S, McGee J, et al. The effect of thin membrane restraint on the ballistic performance of armor grade ceramic tiles [J]. Int J Impact Eng, 2007, 34(2): 277-302.

[17] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate [J]. J Appl Phys, 1980, 51(3): 1498-1504.

Numerical Simulation of the Destructive Process of Shock-Loaded Alumina Ceramics Using Smoothed Particle Hydrodynamics

WANG Feng-Ying[1], LIU Ying-Bin[1,2], LIU Tian-Sheng[1], HU Xiao-Yan[2]

(1. *School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*;
2. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: Ceramics materials have been widely used in military projects, aerospace, aviation and ship structure protection, due to their good mechanical properties such as low density, high strength and high sound velocity. The destructive process of alumina ceramic impacted by a tungsten alloy projectile is simulated using smoothed particle hydrodynamics (SPH) techniques of AUTODYN. The simulation results are consistent with the experimental results, which indicate that the method is feasible and effective. The method proposed provides a convenient and economical way to study the failure behavior of alumina ceramic under strong impact loading.

Key words: shock; alumina ceramics; penetration; smoothed particle hydrodynamics